

II-147 砂漣上の浮遊砂流に関する研究

長岡技術科学大学工学部 正員 福嶋 祐介
大成建設（株） 正員 常松 優

1. はじめに

河床に砂漣などの河床波が形成された場合、クレスト背後で流れは剥離を起こし複雑な流れ場を形成する。そしてこれらは、砂の浮遊に大きく響を及ぼしている。本研究は移動床上に形成される砂漣に対して流速、濃度分布を測定すると共に浮遊砂粒子の可視化を行い、砂漣上の浮遊砂の運動及び分布特性を検討した。また、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いてこれに対する数値計算を試みた。

2. 実験の概要

実験には、幅20cm、高さ30cmの断面を有する全長11mの可変勾配水路を用いた。実験手順は、水路に砂（比重2.65、沈降速度1.57cm、中央粒径0.16mmのほぼ一様粒形のケイ砂）を一様厚さに敷き詰めた後、給砂を行いながら一定流量の水を流し、水路全体に渡ってほぼ平衡な砂漣が発達した後、その中で二次元性の強いものに対して濃度及び流速測定を行った。また同様に形成した砂漣をスリット光で照らし写真撮影することで浮遊砂粒子の可視化を行った。濃度測定は直径2mmのパイプを5mm間隔で配したサイフォンを用い、流速測定は直径3mmのプロペラ流速計により行った。

3. 実験結果

(1) 流速及び濃度分布特性

実験は、水路勾配と流量の2つを変化させて数種類行った。その一例としてRun.A-1.2の流速、濃度分布図を図-1に示す。図中に目視により観測された剥離領域を点線で示している。実験条件を表-1に示す。

表-1 実験条件

Run.No	勾配	流量 $Q(\text{cm}^3/\text{s})$	平均水深 $h(\text{cm})$	Fr	Re	波長 $\lambda(\text{cm})$	波高 $\Delta(\text{cm})$
A-1.1	1/350	2807	5.23	0.37	7260	12.0	1.4
A-1.2	1/350	2491	4.68	0.39	7440	12.1	1.2
B-2.1	1/400	3136	5.64	0.37	7860	12.2	1.3

流速分布より砂漣上の流況について以下の事がわかった。クレスト上では、鉛直方向にほぼ一様な分布を示す。クレスト背後では、急激な水深の増加により流れが剥離し渦を形成する。再付着点（約 $x=6.0\text{cm}$ ）からは境界層が発達し、また下流クレストに向かって縮流となっているため流れが加速され、流速分布の歪が徐々に緩和して行き下流クレストに向かって分布形は一様になる傾向を示す。

濃度については次のような分布特性を示すのがわかった。クレストでは底面付近で濃度が高くなっているもののほぼ一様な分布を示す。剥離領域では濃度が増加し分布の重心が底面付近に移ってくる。再付着後は、底面付近の濃度勾配が小さくなって行き、全体として分布の重心を上に移し下流クレストに向かって一様になる傾向を示す。

以上述べたように、流速及び濃度分布ともに再付着点を境に分布の特性が異なるのがわかった。なおこれらの分布特性は、既往の固定床砂漣についての研究結果¹⁾とほぼ一致するものであった。

(2) 浮遊砂粒子の可視化

浮遊砂粒子の可視化結果より得られた砂粒子の速度ベクトルを図-2に示す。これより、クレストの底面

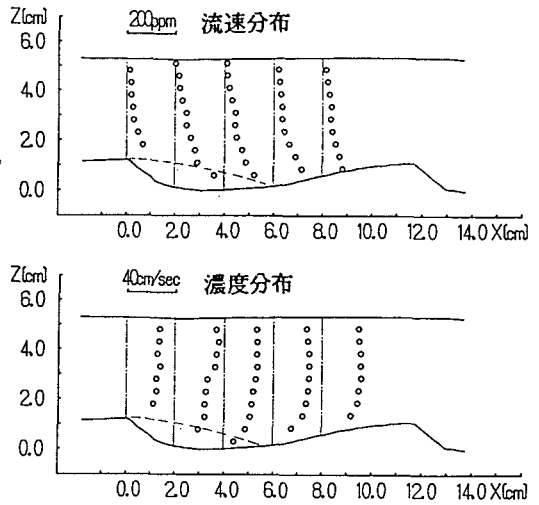


図-1 実験結果(Run.A-1.2)

より激しく砂を巻き込んでいるのがわかる。これらの砂の多くは剥離渦内に取り込まれ、渦の循環運動によりこの領域に留まる。これが剥離領域の濃度を大きくしている原因である。再付着点付近（ $x=6\sim7\text{cm}$ ）において、大きな上向き成分を有しているものがあり、この部分において強い上昇流が存在しているのがわかった。濃度分布が再付着後分布の重心を上に移し一様化するの、この上昇流によるものであると考える。

4. 数値計算

砂漣の様な複雑な幾何形状を有する流路に適用できるように、従来用いてきた $k-\varepsilon$ モデルを適用した基礎方程式²⁾をテンソル系に書き改め、座標系としては境界に沿った曲線座標を用いて数値計算を行った。基礎方程式は、連続の式、運動方程式、浮遊砂の拡散方程式、乱れエネルギーの収支式、粘性逸散率の輸送方程式である（表-2参照）。これらの方程式をPatankar³⁾の方法により離散化しSIMPLE法により計算を行った。

計算結果の一例を図-3に示す。計算結果は実線で、実験結果は○印で示してある。剥離渦の三次元性や実験精度を考慮すれば、計算結果は砂漣上の浮遊砂流をうまく再現しているといえる。だが剥離渦を十分に再現しているとは言えず、今後この剥離領域での精度を向上していく必要がある。

5. まとめ

(1) 移動床上の砂漣について実験を行った結果、砂漣上の浮遊砂を支配しているのはクレスト背後の剥離渦と再付着点より生ずる強い上昇流であることが砂粒子の可視化により明らかとなった。

(2) 本研究の数値計算プログラムは砂漣上の浮遊砂流を再現可能であるが、剥離領域においては今後精度の向上を図る必要がある。

6. 参考文献

- 1) 関根, 吉川: 砂漣上の浮遊砂流に関する実験的研究, 土木学会論文集 第387号/Ⅱ-8, 1987.
- 2) 福田, 福嶋: 浮遊砂流に対する $k-\varepsilon$ 乱流モデルの適合性について, 第31回水理講演会講演集, 1987.
- 3) 例えば, 水谷, 香月共訳: Patankar原著, コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 1985.

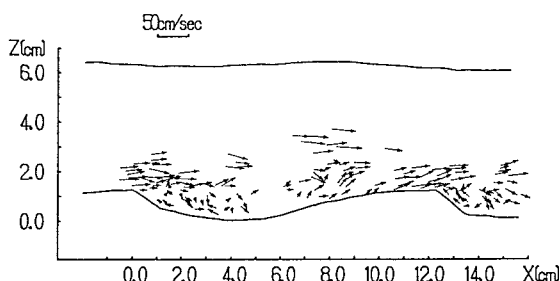


図-2 浮遊砂粒子の速度ベクトル(Run. B-2.1)

表-2 基礎方程式

(1) 連続の式 $\frac{\partial V_i}{\partial y_i} = 0$
(2) V_i 方向の運動方程式 $\frac{\partial V_i V_i}{\partial y_i} = -\frac{\partial}{\partial y_i} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} k + (1+\alpha) g_{ii} z' \right) + \frac{\partial}{\partial y_i} \left((v_i + v) \frac{\partial V_i}{\partial y_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y_i} \left(v_i \frac{\partial V_i}{\partial y_i} \right)$
(3) 浮遊砂の拡散方程式 $\frac{\partial V_i C}{\partial y_i} = \frac{\partial}{\partial y_i} \left(\frac{v_i}{\sigma_i} \frac{\partial C}{\partial y_i} \right) + \frac{\partial V_i C}{\partial y_i} \delta'_{ii}$
(4) 乱れエネルギーの収支式 $\frac{\partial V_i k}{\partial y_i} = \frac{\partial}{\partial y_i} \left(v_i + \frac{v_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y_i} + v_i \left(\frac{\partial V_i}{\partial y_i} + \frac{\partial V_i}{\partial y_i} \right) \frac{\partial V_i}{\partial y_i} - \beta g_{ii} \frac{\partial z'}{\partial y_i} \frac{v_i}{\sigma_l} \frac{\partial C}{\partial y_i} - \varepsilon$
(5) 粘性逸散率の輸送方程式 $\frac{\partial V_i \varepsilon}{\partial y_i} = \frac{\partial}{\partial y_i} \left(v_i + \frac{v_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y_i} + C1 \varepsilon \frac{\varepsilon}{k} (Pr+G) (1+C3 \varepsilon \cdot Rf) - C2 \varepsilon \frac{\varepsilon^2}{k}$

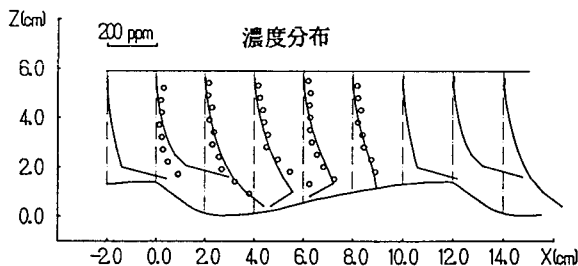
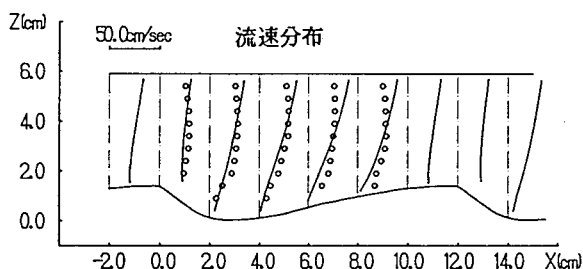


図-3 実験結果と計算結果の比較(Run. A-1.1)